

基于改进 PSO-BP 算法的矩形顶管隧道地表沉降预测

陈艺¹ 黄政¹ 张洪¹ 周振军¹ 唐聪¹ 胡达^{2,3*}

1 中建五局土木工程有限公司

2 湖南城市学院, 城市地下基础设施结构安全与防灾湖南省工程研究中心

3 湖南城市学院, 土木工程学院

DOI:10.12238/btr.v7i5.4533

[摘要] 在矩形顶管隧道工程中,现有有限元、数值模拟等方法难以准确的对隧道顶进施工引起的地表沉降进行预测。因此,本文基于BP神经网络的多参数输入下对任意函数的高逼近性,考虑自适应变异方法,采用自适应惯性权重和变异粒子后期寻优改进的粒子群算法(PSO),确定预测模型的最优超参数,建立超浅埋大断面矩形顶管隧道地表沉降PSO-BP预测模型。通过对超浅埋大断面矩形顶管隧道案例进行研究,将该算法与传统算法结合现场监测数据进行对比分析和预测。预测结果表明:改进的PSO-BP神经网络预测模型相比于传统BP神经网络预测模型在地表沉降变化平缓和凹凸性较大时均呈现更加稳定的预测效果,预测沉降值与真实值较为接近,预测的准确性和鲁棒性显著提高。

[关键词] BP神经网络; 地表沉降; 隧道施工; 矩形顶管; 粒子群算法

中图分类号: U455 文献标识码: A

Prediction of surface settlement of rectangular pipe jacking tunnel based on improved PSO-BP algorithm

Yi Chen¹ Zheng Huang¹ Hong Zhang¹ Zhenjun Zhou¹ Cong Tang¹ Da Hu^{2,3*}

1 China Construction Fifth Engineering Co., Ltd.

2 Hunan City University, Hunan Engineering Research Center for Structural Safety and Disaster Prevention of Urban Underground Infrastructure

3 Hunan City University, School of Civil Engineering

[Abstract] In the rectangular pipe jacking tunnel project, the existing finite element and numerical simulation methods are difficult to accurately predict the ground settlement caused by tunnel jacking construction. Therefore, based on the high approximation to any function under the multi-parameter input of BP neural network, this paper considers the adaptive mutation method, adopts adaptive inertia weight and improved particle swarm optimization (PSO) to determine the optimal superparameter of the prediction model, and establishes a PSO-BP prediction model for the surface settlement of ultra-shallow buried large-section rectangular pipe-jacking tunnel. By studying the case of ultra-shallow rectangular pipe jacking tunnel with large cross section, the algorithm and traditional algorithm are compared and predicted by combining the field monitoring data. The prediction results show that the improved PSO-BP neural network prediction model has a more stable prediction effect compared with the traditional BP neural network prediction model, and the predicted settlement value is close to the real value, and the accuracy and robustness of the prediction are significantly improved.

[Key words] BP neural network; Surface subsidence; Tunnel construction; Rectangular pipe jacking; Particle swarm optimization algorithm

引言

矩形顶管顶进施工技术因其施工安全可靠、对周围环境扰动小等常用于城市下穿隧道工程中。超浅埋大断面矩形顶管隧

道在顶进过程中不可避免地对周围地层产生扰动,改变地层的应力场和位移场的分布,并随着时间的增加最终影响隧道所在地层的总体固结沉降。因此,准确预测矩形顶管隧道引起的地面

沉降对降低工程施工对周边环境的影响和确保工程安全具有十分重要的意义。

人工智能算法具有强大的信息处理能力,如非线性、高并行性和高容错性的学习和泛化能力^[1]。其中,机器学习算法可以通过足够数量的样本输入来学习数据特征,然后对数据进行回归拟合分析,进而有效地分析具有相似模式的新输入并进行预测^[2]。近年来,人工神经网络、支持向量机和随机森林算法成为现阶段用于预测盾构隧道引起的地表沉降的主要机器学习算法^[3]。Ramezanshirazi和Tang等^[4,5]都通过机器学习算法来对隧道施工引起的地表沉降进行有效预测。Chen^[6]等通过对比六种机器学习算法的效率和可行性,发现回归神经网络和随机森林算法在六种机器学习算法中可以表现出最好的性能,能准确识别隧道引起的沉降的演变。Elbaz^[7]等提出一种改进粒子群优化结合自适应神经模糊系统的计算模型来预测土压力平衡(EPB)盾构性能。Cao^[8]等提出了一种比现有的机器学习技术和算法具有更高的预测精度和可接受的计算效率的深度学习模型。Li等^[9]人通过长短期记忆(LSTM)机器学习算法对大直径盾构隧道施工引起的不同地层的沉降发展进行有效预测。Ghiasi^[10]等通过对土黏聚力、内摩擦角、渗透系数一系列影响地表沉降的变量进行单独评估后,设计了一个多层感知器(MLP)人工神经网络来准确预测地表沉降。随着研究的深入,机器学习算法将会越来越多的被利用于隧道工程之中。

本文依托柳叶大道西延线矩形顶管隧道施工实时监测数据,采用改进的粒子群算法(PSO)结合传统的BP神经网络建立PSO-BP矩形顶管隧道地表沉降预测模型,并对新旧两种算法模型的预测性能和稳定性进行了对比分析,以期对类似矩形顶管隧道设计施工提供理论支撑和技术参考。

1 沉降预测方法

1.1 PSO-BP算法

本文提出的改进的PSO-BP神经网络模型以下统称为PSO-BP模型,传统的BP神经网络突出优点就是具有很强的非线性映射能力和柔性的网络结构。网络的中间层数、各层的神经元个数可根据具体情况任意设定,操作较为简单便捷,但学习率慢,收敛时间较长效果不佳,同时随机生成的初始权重和阈值会对结果造成较大的影响,从而整体降低网络的预测性能。为了减少影响,本文采用改进粒子群算法,同时引入线性递减惯性权重,更好的平衡了算法全局搜索能力和局部搜索能力,更新公式如(1)所示。通过粒子的全局搜索,后期粒子搜索陷入局部最优时产生变异跳出局部点重新进行搜索,直到找到最优个体和损失目标值,进行适应度判断后输出,适应度函数Fitness如式(2)所示,否则继续迭代,从而对权重和阈值的调整进行优化加快网络的收敛速度和提高网络的学习效率。

$$\omega^j = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \cdot \left(\frac{i}{i_{all}} \right) \quad (1)$$

$$Fitness = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (2)$$

式中: ω_{start} 、 ω_{end} 为起始惯性权重; i 、 i_{all} 为当前迭代次数和总迭代次数; x_i 、 y_i 分别为输出层

预测值和真实值。

1.2 数据处理及模型评估

为避免计算过程中由于各指标的量级不同在网络训练过程中存在梯度爆炸现象,输入数据后应对其进行预处理归一化操作后再进入网络,归一化公式如公式(3)所示,将所有数据映射到[-1, 1]的区间上,所有计算完成后在进行反归一化并可视化结果。

$$x_m = 2 \times \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} - 1 \quad (3)$$

式中: x_{min} 、 x_{max} 为数据 x 的最值。

为评价两种算法在预测矩形顶管法开挖的隧道施工地层沉降的性能差异,本文采用相关性系数(R)和均方误差(MSE),平均绝对误差(MAE)三种误差指标来评判模型优劣性。

1.3 数据库

本文所有数据均来源于柳叶大道矩形顶管隧道施工现场监测。根据Zhang等^[11]的研究,影响地表沉降的因素可以分为隧道几何参数、掘进参数、地质条件和异常因素四类。由于人工同时在同一水平面开挖,隧道的相关规格和埋深几乎没有变化。

在此不予考虑隧道几何参数对结果造成的影响。掘进参数的选择中主要选取顶进力和掘进速度,这些参数是顶管顶进施工控制的关键参数,并能通过传感器等数据采集系统实时采集,准确可靠。同时还考虑到注浆压力等参数对超挖空隙以及后期沉降的较大影响^[12]。因此,以上掘进参数的几个变量是影响地表沉降的主要因素。地质条件需考虑土层的基本物理力学性质以及土层的空间位置,本工程开挖的土体较为单一,均为粉质粘土,因此可以忽略地质条件对结果造成的影响。由于隧道顶进施工采用人工掏土的方式,过程相对简单且异常因素较少,因此暂不考虑。综上,选取顶进力、掘进速度、注浆压力作为预测模型的输入参数,一共27组数据,前20组占比约75%用于模型的训练计算,后7组用于测试集预测。

2 工程案例

2.1 工程概况

柳叶大道西延线在道路中心桩号K7+081.113处设置2孔净孔径18.2×6.0m斜交矩形顶管隧道,矩形顶管隧道与长张高速斜交63.881°,每孔矩形顶管隧道全长51m,矩形顶管隧道顶覆

土厚度约2.000~2.683m。矩形顶管隧道作业设置3处中继间,矩形顶管隧道按4节预制,每节长度分别为12m、13m、13m、13m,结构设计为P8级C40防渗钢筋混凝土。矩形顶管隧道顶板、侧墙厚均为130cm,底板厚140cm,两矩形顶管隧道之间间距150cm。矩形顶管隧道采用设置工作坑、后背墙、滑板、现场搭设钢盾构支架矩形顶管隧道施工,采用“斜交、斜做、正顶”的施工工艺。每节矩形顶管隧道相连的沉降缝宽为4cm。柳叶大道西延线矩形顶管隧道总体布置图1所示(其中高程单位为m,宽度单位为cm)。

2.2 施工方法

本工程施工中无法中断长张高速公路路面交通,采用在现场搭设钢盾构支架,在矩形顶管隧道中继间间及尾端布设相匹配的千斤顶进行顶进施工,但顶进施工会对路基扰动,引起沉降,当沉降过大时会影响行车安全。本工程采用钢盾构支架来保持公路坡比,提高了施工的安全性和适用性,特别是对于框架顶进施工更具有可靠性,最大限度地减少浅覆盖层顶进施工过程中对公路路基的扰动。因此,须对路面变形进行监测,以控制顶进速率和挖土量,从而控制沉降,确保路面行车安全和矩形顶管隧道出洞安全。

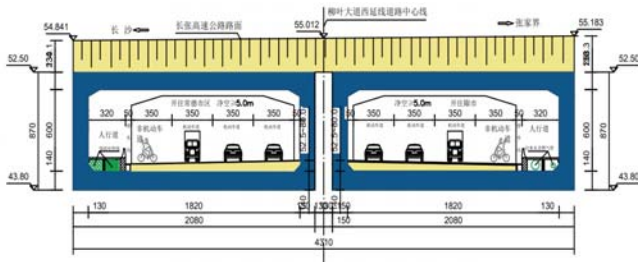


图1 柳叶大道西延线矩形顶管隧道示意图

3 预测结果

3.1 沉降数据分析

依照上面的数据及参数建立两个网络模型,当分析某一天纵向沉降数据时,此时以上的四个变量将均视为常量,唯一的自变量为距矩形顶管隧道中心线的距离,根据测点的分布得出数据,依照上文的方法对纵向的沉降进行预测分析得到左右幅测点真实沉降和预测沉降对比图如下图2~图3所示:

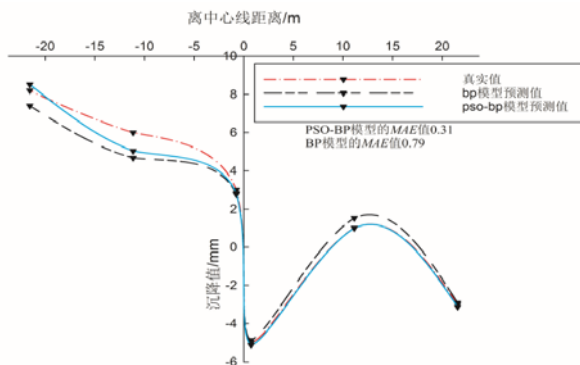


图2 左幅纵向测点预测对比图

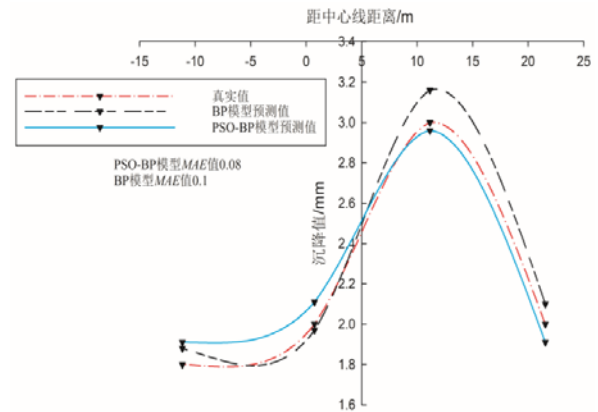


图3 右幅纵向测点预测对比图

从图2~3整体可以看出当沉降值的波动值较大时传统的BP神经网络预测效果明显较差,而波动较为平缓时预测性能一般,自变异的PSO-BP模型除了个别点数据失真预测效果不佳外,其他点的预测结果和真实沉降值结果基本一致,综合预测效果明显均优于传统的BP神经网络模型。由此可知,两种算法对纵向的沉降数据的预测均不错,但改进的PSO-BP算法误差指标更低,表现的更稳定和优越。

3.2 算法性能对比

为了更好的比较两种算法模型对左右矩形顶管隧道测点的预测性能,这里主要采用了左右幅横向测点评价指标的均值进行对比,预测性能对比图如下图所示。除了右幅矩形顶管隧道测试集BP模型的MSE指标存在爆炸外,其他MSE指标均在20以下且PSO-BP算法相比于未改进的算法有明显的较大坡度下降。PSO-BP算法的最大MAE指标为1.72,而未改进的算法该项最大指标为5.79,相差4.02,前者最小指标为0.96,后者为1.57,相差0.61,差距不大。PSO-BP算法的R值明显大于未改进的算法,前者稳定在0.90以上,而后者最大为0.74。综合说明在本文的开挖工程预测隧道沉降实例中PSO-BP算法相比传统的BP神经网络具有更深度的学习力和稳定性,收敛较快,寻优效果明显,所耗时间也相对较短。

4 结论

本文提出了一种改进的PSO-BP算法,通过引入自适应惯性权重和粒子变异因素,结合传统BP神经网络,对地表沉降进行预测。主要结论如下:

(1)在矩形顶管隧道施工引起的地表沉降预测中,改进算法的误差明显低于传统BP神经网络,最大单点预测误差为-2mm,而后者为30mm,整体预测误差均值分别为-1.814mm和9.189mm。纵向方向的结果显示改进算法优于传统算法,但差距不大。

(2)当沉降数据波动较大时,传统神经网络的误差指标会爆炸,未能深入挖掘变量间关系,而改进算法在拟合真实数据方面表现更佳。

(3)综合考虑预测误差和模型性能,改进的PSO-BP模型可作为矩形顶管隧道施工引起的地表沉降预测工具。

需要注意的是,本文的数据仅限于特定隧道施工,未考虑其他可能影响沉降的因素,因此其他地区应用该模型时需进一步验证和调整。

[基金项目]

湖南省自然科学基金(No.2023JJ30110);湖南省教育厅科学研究重点项目(No.23A0568)。

[参考文献]

- [1]JAIN A K,MAO J,MOHIUDDIN K M.Artificial neural networks: A tutorial[J].Computer,1996,29(3):31-44.
- [2]JAVAD G, NARGES T. Application of artificial neural networks to the prediction of tunnel boring machine penetration rate[J].Mining Science and Technology(China), 2010, 20(5): 727-33.
- [3]陈仁朋,戴田,张品.基于机器学习算法的盾构掘进地表沉降预测方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(7):111-8.
- [4]RAMEZANSHIRAZIM,SEBASTIANID,MILIZIANOS.Artificial Intelligence to Predict Maximum Surface Settlements Induced by Mechanized Tunneling; proceedings of the National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering, F, 2019 [C].Springer.
- [5]TANG J C, PENG L, CHEN Z. A Computational Approach of Displacement Prediction in an Engineering Project; proceedings of the Journal of Physics: Conference Series, F, 2022 [C]. IOP Publishing.
- [6]CHEN R,ZHANG P,WU H,etal.Prediction of shield tunneling -induced ground settlement using machine learning techniques

[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(6): 1363-78.

[7]ELBAZ K, SHEN S-L, SUN W-J, et al. Prediction model of shield performance during tunneling via incorporating improved particle swarm optimization into ANFIS[J].IEEE Access, 2020,8:39659-71.

[8]CAO Y, ZHOU X, YAN K. Deep learning neural network model for tunnel ground surface settlement prediction based on sensor data[J].Mathematical Problems in Engineering,2021.

[9]LI C,LI J, SHI Z, et al. Prediction of Surface Settlement Induced by Large-Diameter Shield Tunneling Based on Machine-Learning Algorithms[J].Geofluids,2022.

[10]GHIASI V, KOUSHKI M. Numerical and artificial neural network analyses of ground surface settlement of tunnel in saturated soil[J].SN Applied Sciences,2020,2(5):1-14.

[11]ZHANG P, CHEN R-P, WU H-N. Real-time analysis and regulation of EPB shield steering using Random Forest[J]. Automation in Construction,2019,106:102860.

[12]马文辉,杨成永,彭华.大直径泥水盾构下穿地铁挡墙路基沉降控制[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(03):44-53.

作者简介:

陈艺(1989—),男,汉族,重庆万盛人,本科,工程师,现从事市政基础设施建设工作。

*通讯作者:

胡达(1984—),男,湖南浏阳人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事隧道及地下工程方面的研究。